

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ / ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

УДК 66.047:633.791

doi: 10.15507/2658-4123.033.202301.114-127

Оригинальная статья



Сверхвысокочастотная хмелесушилка с поярусно расположенными резонаторами

М. В. Просвирякова¹, В. Ф. Сторчевой¹✉, Н. Г. Горячева²,
О. В. Михайлова³, Г. В. Новикова³, А. В. Сторчевой⁴

¹ РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева
(г. Москва, Российская Федерация)

² Академия гражданской защиты МЧС России
(г. Химки, Российская Федерация)

³ Нижегородский государственный
инженерно-экономический университет
(г. Княгинино, Российская Федерация)

⁴ Московский государственный университет
пищевых производств (г. Москва, Российская Федерация)

✉ energo-air@rgau-msha.ru

Аннотация

Введение. Из анализа хмелесушилок различных систем и конструкций вытекает перспектива сушки хмеля комплексным воздействием энергии электромагнитного поля сверхвысокой частоты и конвективного тепла.

Цель статьи. Разработка конструкции малогабаритной СВЧ-конвективной хмелесушилки с обоснованными параметрами и интенсивной технологией сушки свежеубранного хмеля.

Материалы и методы. С учетом обоснованных критериев проектирования хмелесушилки и анализа существующих резонаторов предложена методика разработки хмелесушилки с энергоподводом в электромагнитном поле, включающая требования к конструкционному исполнению, к эксплуатационным и экономическим показателям и технологии. Электродинамические параметры резонатора исследованы по программе CST Studio 2017.

Результаты исследования. Исследованы диэлектрические параметры хмеля и получены функциональные зависимости от влажности при частоте 2 450 МГц. Исследована динамика нагрева хмеля при изменении его фактора диэлектрических потерь в процессе воздействия электромагнитного поля сверхвысокой частоты. Разработана конструкционно-технологическая схема радиогерметичной СВЧ-конвективной

© Просвирякова М. В., Сторчевой В. Ф., Горячева Н. Г., Михайлова О. В., Новикова Г. В., Сторчевой А. В., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

хмелесушилки непрерывно-поточного действия с поярусно расположенными резонаторами для агропредприятий малой мощности. В экранирующем цилиндрическом корпусе поярусно расположены резонаторы: первый и третий резонаторы полусферические, а средний выполнен в виде эллипсоида для обеспечения высокой напряженности электрического поля. Транспортирование сырья происходит путем вращения дисков в шадящем режиме.

Обсуждение и заключение. Ожидаемые удельные энергетические затраты хмелесушилки производительностью 12–13 кг/ч при мощности СВЧ генераторов 4,0 кВт для сушки свежесобранного хмеля влажностью 76–82 % до влажности 11–14%, составляют 0,30–0,33 кВт·ч/кг. Необходимая напряженность электрического поля 2 кВ/см во всех трех резонаторах обеспечивается, следовательно, обеззараживание сырья происходит при температуре 65–70 °С за 5–6 мин пребывания в трех резонаторах. Интенсивность влаговыделения из шишек хмеля при эндогенно-конвективным нагреве возрастает в 5–6 раз, по сравнению с конвективным способом сушки. Внедрение микроволновой технологии сушки с применением конвективного способа испарения и удаления влаги из сушильной камеры позволяет сократить продолжительность процесса, сберечь ценные компоненты шишек для пивоварения.

Ключевые слова: хмелесушилка, СВЧ-конвективный способ, магнетроны воздушного охлаждения, электромагнитное поле сверхвысокой частоты, свежесобранный хмель, диэлектрические параметры

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Сверхвысокочастотная хмелесушилка с поярусно расположенными резонаторами / М. В. Просвирякова [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 1. С. 114–127. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.114-127>

Original article

Ultrahigh-Frequency Hop Dryer with Tiered Resonators

M. V. Prosviryakova^a, V. F. Storchevoy^a ✉, N. G. Goryacheva^b,
O. V. Mikhaylova^c, G. V. Novikova^c, A. V. Stotchevoy^d

^a Russian Timiryazev State Agrarian University
(Moscow, Russian Federation)

^b Civil Defence Academy of EMERCOM of Russia
(Khimki, Russian Federation)

^c Nizhny Novgorod State Engineering and Economics University
(Knyaginino, Russian Federation)

^d Moscow State University of Food Production
(Moscow, Russian Federation)

✉ energo-air@rgau-msha.ru

Abstract

Introduction. From the analysis of hop dryers of different systems and designs follows the prospect of hop drying by complex influence of the energy of the electromagnetic field of ultrahigh frequency and convective heat.

Aim of the Article. The article aims at developing a small-sized microwave convective hop dryer with justified parameters for intensive drying technology of freshly harvested hops. *Materials and Methods.* Taking into account the justified criteria for the design of a hop dryer and the analysis of existing resonators, there was proposed a methodology for the development of a hop dryer with an energy supply in an electromagnetic field, including requirements for structural design, operational and economic indicators, and technology. The electrodynamic parameters of the resonator were investigated according to the CST Studio 2017 program.

Results. The dielectric parameters of hops are theoretically investigated and functional dependences on humidity at a frequency of 2,450 MHz are obtained. The dynamics of hop heating is investigated when its dielectric loss factor changes during the action of an ultrahigh frequency electromagnetic field. There has been developed a design and technological scheme of a radio-hermetic microwave convective hop dryer of continuous flow action with tiered resonators for low-power agricultural enterprises. Resonators are arranged in tiers in the screening cylindrical housing: the first and third resonators are hemispherical, and the middle one is made in the form of an ellipsoid to ensure a high electric field strength. The transportation of raw materials takes place by rotating the discs in a gentle mode.

Discussion and Conclusion. The expected specific energy costs of a hop dryer with a capacity of 12–13 kg/h at the microwave generator power of 4.0 kW for drying freshly harvested hops with a humidity of 76–82% to a humidity of 11–14% are 0.30–0.33 kWh/kg. The required electric field voltage of 2 kV/cm in all three resonators is provided, therefore, disinfection of raw materials occurs at a temperature of 65–70°C for 5–6 minutes of stay in three resonators. The intensity of moisture release from hop cones during endogenous convective heating increases 5–6 times compared to the convective drying method. The introduction of microwave drying technology using a convective method of evaporation and removal of moisture from the drying chamber reduces the duration of the process, saves valuable components of cones for brewing.

Keywords: hop dryer, microwave convective method, air-cooled magnetrons, ultrahigh frequency electromagnetic field, freshly harvested hops, dielectric parameters

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Prosviryakova M.V., Storchevoy V.F., Goryacheva N.G., et al. Ultrahigh-Frequency Hop Dryer with Tiered Resonators. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(1):114–127. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.114-127>

Введение

Хмель возделывают в 25 странах. По производству хмеля Россия занимает 7 место в мире. Валовый сбор хмеля в последние годы, например в Чувашской Республике, составляет 170–175 т, урожайность достигает 16–17 ц/га. Правительство России приняло целевую программу, где особое внимание уделяется послеуборочной обработке, включая разработку высокоинтенсивных хмелесушилок. Задача сушки хмеля сводится к сохранению хорошего товарного вида, цвета и аромата, сохранению максимального количества компонентов горьких веществ (12–22 %), дубильных веществ (2–5 %) и эфирных масел (0,2–0,8 %) для применения в пивоварении [1].

Цель работы – разработка конструкционного исполнения малогабаритной СВЧ-конвективной хмелесушилки с обоснованными параметрами и интенсивной технологией сушки свежесобранного хмеля.

Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

- проанализировать диэлектрические и теплофизические параметры свежесобранного хмеля и математически описать их функциональные зависимости от температуры и влажности при частоте 2 450 МГц;
- изучить распределение электрического поля в поярусно расположенных нестандартных резонаторах;
- разработать конструктивно-технологическую схему радиогерметичной хмелесушилки непрерывно-поточного действия с поярусно расположенными резонаторами;
- определить эффективные энергетические параметры и режимы работы хмелесушилки.

Обзор литературы

Для сушки используют калориферные сушилки и установки активного вентилирования. Хмелесушилки различных систем и конструкций отличаются числом сушильных камер и ярусов

сушильных сит, способом загрузки и выгрузки хмеля и вентилирования, типом топки. Применение циркуляции теплоносителя с помощью нагнетательной или вытяжной вентиляции увеличивает производительность хмелесушилок, но скорость теплоносителя должна быть не более 0,6 м/с. Обычно теплый воздух от калорифера поступает под нижний слой сушильной камеры.

Имеются хмелесушилки ПХБ-750 [2], ХС-400, мобильная хмелесушилка [3], где повышения термического КПД процесса сушки предлагается достичь за счет предварительного кондиционирования атмосферного воздуха и частичной рекуперацией агента сушки¹. В технологии, реализованной в хмелесушилке с источником электромагнитного поля высокой частоты (40,68 МГц) для равномерной сушки свежесобранного хмеля, необходимо согласовать с высокой точностью толщину слоя, плотность, скорость передвижения транспортеров с температурой нагрева по ярусам².

Поэтому разработка хмелесушилки непрерывно-поточного действия для сушки свежесобранного хмеля с использованием энергии электромагнитного поля сверхвысокой частоты и конвективного нагрева с сохранением потребительских характеристик актуальна.

Для агропредприятий разной мощности разработано несколько вариантов хмелесушилок с энергоподводом в электромагнитном поле, обеспечивающих реализацию основных критериев: непрерывность процесса сушки с использованием магнетронов воздушного охлаждения, радиогерметичность сушилки, высокая напряженность электрического поля в сырье, равномерность распределения волн

в резонаторах. Все хмелесушилки содержат металлodieлектрические резонаторы с криволинейными поверхностями: патент № 2774186 [4; 5], патент № 2772992 [6], патент № 2770628 [7], патент № 2772987³ [8].

Все эти сушилки с энергоподводом в электромагнитном поле рационально использовать при сушке хмеля производительностью 150–200 кг/ч. Для фермерских хозяйств, где необходимая производительность хмелесушилки до 50 кг/ч, нужна малогабаритная СВЧ-конвективная сушилка. Поэтому разработка малогабаритной хмелесушилки непрерывно-поточного действия ярусного типа для сушки свежесобранного хмеля с использованием энергии электромагнитного поля сверхвысокой частоты и конвективного нагрева с сохранением потребительских характеристик важна.

Материалы и методы

При разработке СВЧ-конвективной хмелесушилки непрерывно-поточного действия после анализа электрофизических характеристик хмеля в зависимости от частоты, влажности, температуры, плотности, по данным И. А. Рогова, теоретически обоснованы

- метод энергоподвода и вид сушильного агента к рабочей камере;
- конструкционные исполнения нестандартных конфигураций резонаторов для трехэтапной сушки хмеля;
- количество и мощность магнетронов с волноводами воздушного охлаждения с волновыми диаграммами диапазона частоты, места их расположения на резонаторах для заданной производительности хмелесушилки;
- конструкционное исполнение грузочного и разгрузочного устройств транспортирующего механизма для

¹ Первичная обработка и хранение хмеля [Электронный ресурс]. URL: https://studopedia.ru/6_37565_pervichnaya-obrabotka-i-hranenie-hmelya.html (дата обращения: 02.10.2022).

² Зайцев Г. В. Сушка хмеля в электромагнитном поле высокой частоты : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1995. 18 с.

³ Пчельников Ю. Н. Электроника сверхвысоких частот. М. : Радио и связь, 1981. 96 с.

обеспечения электромагнитной безопасности при непрерывном режиме работы;

- тип и мощность теплогенераторов, вентиляторов и места их расположения на хмелесушилке;

- эффективные электродинамические параметры резонаторов, такие как собственная добротность, напряженность электрического поля, мощность потока излучений;

- эффективные режимы сушки хмеля в каждом резонаторе, а именно: доза воздействия электромагнитного поля сверхвысокой частоты, расход конвективного тепла, расход энергии диэлектрического нагрева, общий расход энергии на хмелесушилку;

- выбор системы контроля, регулирования и управления процессом сушки хмеля;

- эксплуатационные затраты на сушку хмеля СВЧ-конвективным способом и традиционным методом⁴.

При проектировании резонаторов нестандартных конфигураций основными критериями служили

- равномерность распределения электрического поля высокой напряженности электрического поля в сырье;

- возможность обеспечения непрерывного режима работы путем использования запердельных волноводов, замедляющих спиралей или ферромагнитных шлюзовых затворов;

- высокая собственная добротность, обеспечивающая повышение термического коэффициента полезного действия;

- допустимая мощность потока излучений около СВЧ-конвективной хмелесушилки (10 мкВт/см^2);

- минимальные удельные энергетические затраты на испарение 1 кг влаги из свежесобранного хмеля при производительности хмелесушилки, удовлетворяющей фермерским хозяйствам.

С учетом всех этих обоснованных критериев проводили тщательную систематизацию и классификацию всего многообразия объемных резонаторов, предназначенных для термообработки сырья агропредприятий, в том числе сотни резонаторов, разработанных в нашей научной школе, после чего предложена методика разработки хмелесушилки с энергоподводом в электромагнитном поле.

Методика предусматривает анализ комплекса технологических требований к конструкционному исполнению хмелесушилки, к эксплуатационным и экономическим показателям. Основные технологические требования следующие: равномерное распределение потока воздуха; равномерная сушка массы и всех компонентов шишки; сохранение цвета, запаха и целостности шишки; сохранение ценных для пивоварения веществ; применение низкой температуры нагрева; регулирование толщины слоя хмеля; соблюдение скважности процесса.

При разработке конструкционного исполнения хмелесушилки, собранной из трех резонаторов с вогнутыми конфигурациями поверхностей, использовано трехмерное компьютерное моделирование установки. Пользуясь программным обеспечением CST Studio 2017 и модулем Time Domain Solver, проводили исследования напряженности электромагнитного поля, мощности потока излучений, собственной добротности резонаторов⁵. В ходе экспериментальных исследований проводились измерения электрических и физических параметров, характеризующих энергетические и технологические параметры процесса сушки: массы, температуры и влажности хмеля, скорости подачи хмеля и др. Пользовались методами и измерительными приборами, применяемыми на практике. Температуру на поверхности

⁴ Рогов И. А., Адаменко В. А., Некрутман С. В. Электрофизические, оптические и акустические характеристики пищевых продуктов. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 288 с.

⁵ Курушин А. А., Пластиков А. Н. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio. М.: МЭИ, 2012. 152 с.

массы хмеля измеряли с помощью тепловизора FLIR B365. Важность шишек хмеля определяли с помощью влагомера Humimeter FLH. Скорость движения воздуха под слоем хмеля в рабочей камере измеряли анемометром и трубкой Пито. Источниками СВЧ-энергии являлись магнетроны с воздушным охлаждением, мощностью 750–850 Вт (MW20MD, MW71ER, CE283GNR, H-MW1317, DL-63L 20S, работающие на частоте 2 450 МГц). Частоту вращения вала электродвигателя контролировали с помощью бесконтактного цифрового тахометра ДЕ22348.

Результаты исследования

Для оценки изменения диэлектрических параметров хмеля в процессе сушки представим структуру в виде «капиллярной модели» по методике И. А. Рогова⁶. Имеются зависимости диэлектрической проницаемости ε и фактора диэлектрических потерь k от влажности:

$$\varepsilon = 81 \cdot \left(\frac{\rho_c}{\rho_e} \right) \cdot (1 - m) \cdot \left(\frac{W}{1 - W} \right),$$

$$k = \left(\frac{\rho_c}{\rho_e} \right) \cdot (1 - m) \cdot \frac{10^6}{2\pi \cdot f \cdot \sigma} \cdot \left(\frac{W}{1 - W} \right). \quad (1)$$

Зная плотность сухих шишек хмеля ($\rho_c = 200 \text{ кг/м}^3$), плотность воды ($\rho_e = 1\,000 \text{ кг/м}^3$), пористость шишек хмеля ($m = 0,5$), влажность хмеля ($W = 76\text{--}82 \%$), удельную проводимость жидкости ($\sigma = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/Ом}\cdot\text{м}$), можно получить формулы (2), пользуясь которыми можно приблизительно оценить изменение диэлектрических параметров хмеля в процессе сушки:

$$\varepsilon = 81 \cdot \left(\frac{200}{1000} \right) \cdot (1 - 0,5) \times$$

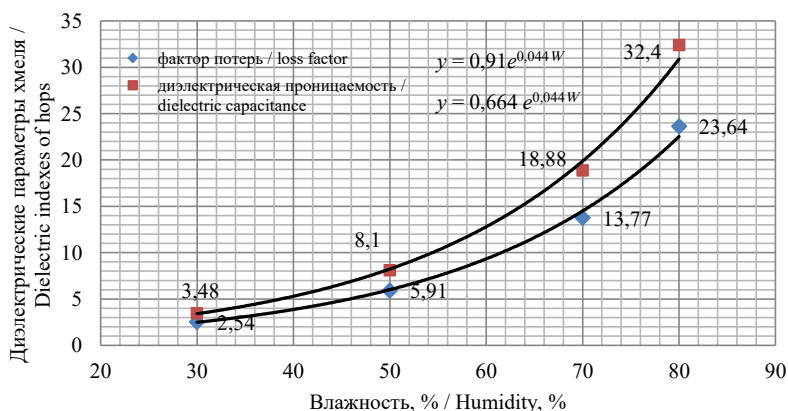
$$\times \left(\frac{W}{1 - W} \right) = 8,1 \cdot \left(\frac{W}{1 - W} \right),$$

$$k = \left(\frac{200}{1000} \right) \cdot (1 - 0,5) \times$$

$$\times \frac{10^6}{2\pi \cdot 2\,450 \cdot 10^6 \cdot 1,1 \cdot 10^{-6}} \cdot \left(\frac{W}{1 - W} \right) =$$

$$= 5,91 \cdot \left(\frac{W}{1 - W} \right). \quad (2)$$

На рисунке 1 представлены зависимости диэлектрических параметров хмеля от влажности, рассчитанные по выражениям (2).



Р и с. 1. Зависимость диэлектрических характеристик хмеля от влажности на частоте 2 450 МГц
F i g. 1. Dependence of dielectric characteristics of hops on humidity at 2,450 MHz

⁶ Рогов И. А., Адаменко В. А., Некрутман С. В. Электрофизические, оптические и акустические характеристики пищевых продуктов.

Для исследования динамики нагрева свежесобранного хмеля необходимо учесть изменения его электрофизических параметров в процессе воздействия электромагнитного поля СВЧ (ЭМП СВЧ). Эти изменения приведены в виде эмпирических зависимостей: фактор диэлектрических потерь при температуре 25–60 °С, $k = 3,28 \cdot e^{-0,024 \cdot T}$; теплоемкость при температуре 0–50 °С, $C = 3\,800$ Дж/кг·°С; плотность хмеля $\rho = 24,12 \cdot e^{0,029 \cdot W}$, при влажности 10–80 % $\rho = 200$ кг/м³.

Известны формулы, описывающие мощность диэлектрических потерь $P_{уд}$ через фактор диэлектрических потерь сырья k и электродинамические параметры E, f системы «резонатор–генератор» (3), а также через физические параметры сырья (4): теплоемкость и плотность⁷ [9; 10]:

$$P_{уд} = 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot k \cdot E^2 = 0,556 \cdot 10^{-12} \cdot f \cdot k \cdot E^2, \text{ Вт/см}^3, \quad (3)$$

где E – напряженность электрического поля, В/см; f – частота электромагнитного поля, Гц:

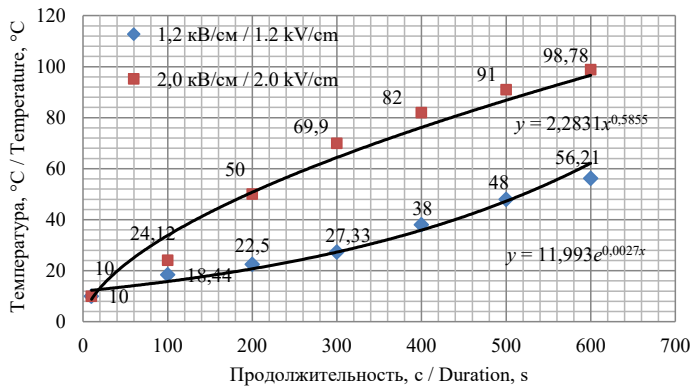
$$P_{уд} = \frac{\Delta T}{\Delta \tau} \cdot \rho \cdot C \frac{1}{\eta} = 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^3}. \quad (4)$$

Из уравнений (3), (4) после интегрирования получено выражение (5), описывающее динамику эндогенного нагрева хмеля в ЭМП СВЧ при разной напряженности электрического поля (ЭП):

$$T = \ln(4,46 \cdot 10^{-9} \cdot E^2 \cdot \tau) / 0,024, \text{ } ^\circ\text{C/с}. \quad (5)$$

Расчеты показывают, что, например, при напряженности электрического поля, равной 2 000 В/см, и продолжительности воздействия 300 с приращение температуры нагрева хмеля влажностью 72 % составит 69,9 °С. Графики, характеризующие динамику нагрева хмеля при разных напряженностях ЭП, приведены на рисунке 2. Если обеспечить в каждом резонаторе по 2 кВ/см, то за 10 мин в единице объема хмеля температура диэлектрического нагрева составит 99–100 °С. Но температура нагрева хмеля выше 65–70 °С не допускается, следовательно, за 5–6 мин пребывания в трех резонаторах шишки хмеля нагреются до 65–70 °С.

Из анализа разработанных резонаторов вытекает, что в эллипсоидном резонаторе, выполненном в виде тьюбинга, и в конденсаторной части тороидального



Р и с. 2. Динамика нагрева хмеля при разных напряженностях ЭП: 1,2 кВ/см; 2,0 кВ/см

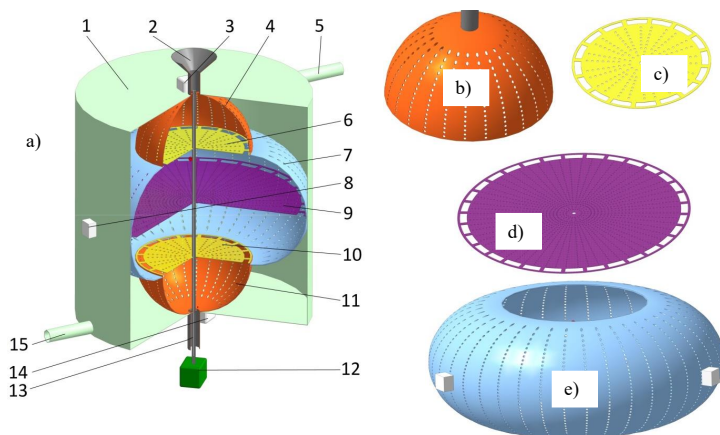
F i g. 2. Dynamics of hop heating at different EF intensities: 1.2 kV/cm; 2.0 kV/cm

⁷ Гинзбург А. С. Расчет проектирование сушильных установок пищевой промышленности. М. : Агропромиздат, 1985. 336 с. ; Афанасьев А. М. Математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса при воздействии интенсивного СВЧ излучения на влагосодержащие объекты сложной структуры : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Волгоград, 2002. 176 с.

резонатора можно обеспечить высокую напряженность электрического поля для стерилизации сырья [11]. Поэтому в соответствии с заданной целью, сушка хмеля в щадящем режиме, и с учетом предварительных расчетов мощности диэлектрического нагрева разработана СВЧ-конвективная хмелесушилка с тремя резонаторами, один из которых выполнен в виде тьюбинга (рис 3).

Хмелесушилка (рис. 3) содержит соосно и попарно расположенные резонаторы 4, 7, 11 в вертикально расположенном

цилиндрическом экранирующем корпусе 1 [12]. Основаниями верхнего 4 и нижнего 11 полусферических перфорированных резонаторов служат соответственно перфорированные неферромагнитные диски 6 и 10, являющиеся основаниями перфорированного эллипсоидного резонатора 7. Внутри него по горизонтальной оси расположен диэлектрический перфорированный диск 9 диаметром меньше диаметра эллипсоида, а диаметры неферромагнитных дисков 6, 10 меньше диаметров полусферических резонаторов 4, 11.



Р и с. 3. Хмелесушилка непрерывно-поточного действия с источниками эндогенно-конвективного нагрева: а) общий вид в разрезе;

- б) верхняя перфорированная полусфера; в) неферромагнитный (это может быть алюминий, медь, золото) перфорированный диск; д) диэлектрический перфорированный диск; е) перфорированный эллипсоидный резонатор; 1 – цилиндрический экранирующий корпус; 2 – запрелдельный волновод; 3 – магнетрон на верхнем полусферическом резонаторе; 4 – верхний полусферический перфорированный резонатор; 5 – запрелдельный волновод-воздухоотвод; 6 – неферромагнитный перфорированный диск; 7 – перфорированный эллипсоидный резонатор из неферромагнитного материала; 8 – магнетроны на поверхности эллипсоидного резонатора; 9 – диэлектрический перфорированный диск; 10 – неферромагнитный перфорированный диск; 11 – нижний полусферический перфорированный резонатор; 12 – электропривод дисков; 13 – запрелдельный волновод – выгрузной патрубок с заслонкой; 14 – магнетроны на поверхности нижнего резонатора; 15 – запрелдельный волновод-воздухоотвод

F i g. 3. Continuous-flow hop dryer with endogenous convective heating sources:

- a) general view in section; b) upper perforated hemisphere; c) non-ferromagnetic (it can be aluminum, copper, gold) perforated disk; d) dielectric perforated disk; e) perforated ellipsoidal resonator; 1 – cylindrical shielding body; 2 – forbidden waveguide; 3 – magnetron on the upper hemispherical resonator; 4 – upper hemispherical perforated resonator; 5 – forbidden waveguide-airguide; 6 – non-ferromagnetic perforated disk; 7 – perforated ellipsoid resonator of non-ferromagnetic material; 8 – magnetrons on the surface of the ellipsoid resonator; 9 – dielectric perforated disk; 10 – non-ferromagnetic perforated disk; 11 – bottom hemispherical perforated resonator; 12 – electric drive of disks; 13 – forbidden waveguide – discharge pipe with a flap; 14 – magnetrons on the surface of the bottom resonator; 15 – forbidden waveguide-air duct

Ширина кольцевых щелей между соответствующими резонаторами и дисками больше продольного размера шишек хмеля. Диски 6, 9, 10 установлены с возможностью регулирования по высоте на вал, вращающийся от электродвигателя 12, расположенного на нижнем основании цилиндрического экранирующего корпуса 1. К верхнему полусферическому резонатору 4 по центру прикреплен запердельный волновод 2 с приемной емкостью, а к нижнему полусферическому резонатору 11 прикреплен запердельный волновод 13 с выгрузной емкостью и заслонкой. Излучатели от магнетронов 3, 14, расположенных на основаниях экранирующего корпуса, направлены в соответствующие полусферические резонаторы. На боковой поверхности экранирующего корпуса со сдвигом на 120 градусов установлены магнетроны 8, так что излучатели направлены в резонатор 7 в виде тьюбинга диаметром, равным диаметру экранирующего корпуса⁸ [12; 13]

Процесс сушки свежесобранного хмеля происходит следующим образом. Закрыть заслонку в приемной емкости 2 и загрузить шишки хмеля. Включить электродвигатель 12, после чего все диски 6, 9, 10 начинают вращаться. Включить калорифер с вентилятором для подачи теплого воздуха (температура воздуха 65–75 °С) через воздухопровод 15 в цилиндрический экранирующий корпус 1. Закрыть заслонку выгрузного патрубка. Открыть заслонку в приемной емкости для подачи сырья через запердельный волновод в верхний резонатор 4. Включить СВЧ-генераторы (магнетроны 3, 8, 10). В процессе вращения дисков 6, 9, 10 шишки хмеля перемешиваются в щадящем режиме, подвергаются воздействию ЭМП СВЧ и нагреваются за счет токов поляризации.

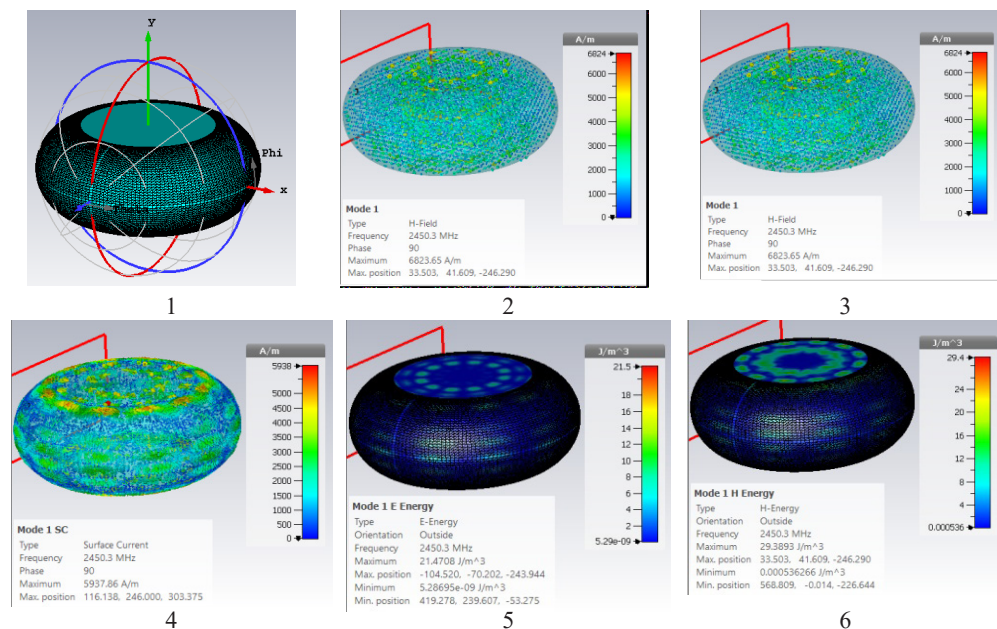
Градиенты температуры, давления и влажности при диэлектрическом

нагреве направлены с центра шишек к периферии, при этом выделенная влага с поверхности шишек испаряется за счет конвективного нагрева теплым воздухом [14; 15]. Отработанный влажный воздух через перфорированные резонаторы 4, 7, 11 и воздухоотвод 5 удаляется. Так как воздухопровод 15 и воздухоотвод 5 расположены по диагонали на основаниях цилиндрического экранирующего корпуса 1, нагретый воздух проникает в слои шишек через поярусно расположенные перфорированные резонаторы. Происходит сушка свежесобранных шишек хмеля за счет диэлектрического и конвективного нагрева. Частично нагретые шишки хмеля высыпаются через кольцевые отверстия между диском 6 и полусферическим резонатором 4 в перфорированный эллипсоидный резонатор и распределяются на поверхности перфорированного диэлектрического диска 9. Здесь в процессе вращения диска 9 шишки хмеля перемешиваются, подвергаются конвективному нагреву и воздействию ЭМП СВЧ другой дозы, чем в верхнем полусферическом резонаторе 4, так как расположены три магнетрона со сдвигом на 120 градусов по периметру эллипсоидного резонатора 7. Поверхностная влага испаряется за счет конвективного нагрева, влажный воздух удаляется через перфорированные резонаторы и воздухоотвод 5. Окончательное высушивание шишек хмеля происходит в нижнем полусферическом перфорированном резонаторе 11, куда с эллипсоидного резонатора сырье высыпается через кольцевое отверстие между ферромагнитным перфорированным диском 10 и поверхностью резонатора 11. Доза воздействия ЭМП СВЧ в этом резонаторе ниже, чем в резонаторе-тьюбинге. Поярусное изменение скорости нагрева сырья, в зависимости от влажности, обеспечивает равномерный эндогенный нагрев шишек хмеля по

⁸ Стрекалов А. В. Электромагнитные поля и волны. Ставрополь : Мир данных, 2006. 169 с.

сечению и сушку, тем самым сохраняет его потребительские свойства. Высушенные шишки хмеля удаляются через запредельный волновод 13 при открытии заслонки на определенную пропускную способность. Ведется контроль температуры и влажности в каждом резонаторе. Расчеты, выполненные по методике С. И. Басакова и В. А. Коломейцева, показывают, что цилиндрический ферромагнитный корпус, толщиной 1,5 см и диаметром, кратным половине длины волны, обеспечивает радиогерметичность хмелесушилки⁹.

Пользуясь трехмерным моделированием объемных резонаторов в программе CST Microwave Studio, SolidWorks, получаем электродинамические параметры резонаторов, в том числе эллипсоидного резонатора (рис. 4)¹⁰. Исследования показывают, что необходимая напряженность ЭП 2 кВ/см во всех трех резонаторах обеспечивается, следовательно, обеззараживание сырья происходит при температуре 65–70 °С за 5–6 мин пребывания в трех резонаторах. Собственная добротность полусферического резонатора составляет 9 000, а эллипсоидного 7 400.



Р и с. 4. Электродинамические параметры эллипсоидного резонатора:

- 1 – распределение электромагнитного поля по осям x, y, z ;
- 2 – напряженность электрического поля, В/м; 3 – напряженность магнитного поля, А/м;
- 4 – поверхностный ток, А/м; 5 – энергия излучения электрической составляющей, Вт/м³;
- 6 – энергия излучения магнитной составляющей, Вт/м³

F i g. 4. Electrodynamics parameters of ellipsoid resonator:

- 1 – electromagnetic field distribution along x, y, z axes; 2 – electric field strength, V/m;
- 3 – magnetic field strength, A/m; 4 – surface current, A/m; 5 – radiation energy of electric component, W/m³;
- 6 – radiation energy of magnetic component, W/m³

⁹ Басаков С. И. Электродинамика и распространение волн. М. : Наука ; Коломейцев В. А. Микроволновые системы с равномерным объемным нагревом. Часть 2. Саратов : СГТУ, 2006. 233 с.

¹⁰ Курушин А. А., Пластикова А. Н. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio.

Обсуждение и заключение

В результате теоретических исследований получены зависимости электрофизических параметров хмеля от влажности и разработана конструкционно-технологическая схема хмелесушилки непрерывно-поточного действия с поярусно расположенными нетрадиционными резонаторами и с источниками энергии электромагнитного поля сверхвысокой частоты.

Предварительно обоснованные удельные энергетические затраты хмелесушилки при мощности СВЧ-генераторов 4,0 кВт (без учета мощности калорифера и вентилятора) для

сушки свежесобранного хмеля влажностью 76–82 % до влажности 11–14 % составляют 0,30–0,33 кВт·ч/кг.

Предварительные экспериментальные исследования показывают, что интенсивность влаговыделения из шишек хмеля при СВЧ-конвективном нагреве возрастает в 5–6 раз, по сравнению с конвективным способом сушки, при сохранении ценных для пивоварения качеств.

Внедрение микроволновой технологии сушки с применением конвективного способа испарения и удаления влаги из сушильной камеры позволяет сократить продолжительность процесса, сберечь ценные компоненты шишек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чеха О. В. Анализ рынка производства и переработки хмеля в системе обеспечения продовольственной безопасности России // Вопросы региональной экономики. 2021. № 3. С. 95–101.
2. Исследование технологического процесса сушки хмеля в сушилке ПХБ-750 / А. О. Васильев [и др.] // Вестник Чувашской ГСХА. 2019. № 1 (8). С. 96–102. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39241139> (дата обращения: 02.10.2022).
3. Комплекс для первичной послеуборочной обработки хмеля : патент 2680709 Российская Федерация / Иванчиков Ю. В. [и др.]. № 2017144962 ; заявл. 20.12.2017 ; опубл. 25.02.2019. URL: https://i.moscow/patents/ru2680709c1_20190225 (дата обращения: 02.10.2022).
4. Хмелесушилка непрерывно-поточного действия с источниками эндогенно-конвективного нагрева : патент 2774186 Российская Федерация / Просвирякова М. В. [и др.]. № 2021121317 ; заявл. 19.07.2021 ; опубл. 16.06.2022. URL: <https://findpatent.ru/patent/277/2774186.html> (дата обращения: 02.10.2022).
5. Хмелесушилка с источниками эндогенно-конвективного нагрева / М. В. Просвирякова [и др.] // Вестник Чувашской сельскохозяйственной академии. 2021. № 2. С. 91–99. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46615198> (дата обращения: 02.10.2022).
6. Хмелесушилка с тороидальными и астроидальными резонаторами с энергоподводом в электромагнитном поле : патент 2772992 Российская Федерация / Просвирякова М. В. [и др.]. № 2021135280 ; заявл. 01.12.2021 ; опубл. 30.05.2022.
7. СВЧ-конвективная хмелесушилка непрерывно-поточного действия с полусферическим резонатором : патент 2770628 Российская Федерация / Просвирякова М. В. [и др.]. № 2021136688 ; заявл. 13.12.2021 ; опубл. 19.04.2022. URL: <https://findpatent.ru/patent/277/2770628.html> (дата обращения: 02.10.2022).
8. Многорезонаторная хмелесушилка с энергоподводом в электромагнитном поле : патент 2772987 Российская Федерация / Просвирякова М. В. [и др.]. № 2021132821 ; заявл. 11.11.2021 ; опубл. 30.05.2022.
9. Сивяков Б. К., Григорьян С. В. Математическое моделирование многоволновой СВЧ установки для сушки продуктов // Вопросы электротехнологии. 2019. № 4. С. 5–11.
10. Казарцев Д. А. Разработка общих видов математических моделей сушки пищевых продуктов с СВЧ энергоподводом на основе законов химической кинетики гетерогенных процессов //

Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2021. Т. 83, № 3. С. 17–22. URL: <https://www.vestnik-vsuet.ru/vguit/article/view/2816> (дата обращения: 02.10.2022).

11. Анализ разработанных сверхвысокочастотных установок для термообработки сырья / Г. В. Новикова [и др.] // Вестник Казанского ГАУ. 2016. № 4. С. 89–93. URL: <https://www.vestnik-vsuet.ru/vguit/article/view/2816> (дата обращения: 02.10.2022).

12. Дробахин О. О., Салтыков Д. Ю. Исследование возможности применения связанных би-конических резонаторов для определения параметров диэлектрических материалов // Прикладная радиоэлектроника. 2014. Т. 13, № 1. С. 64–68.

13. Сверхвысокочастотная хмелесушилка с паярусо расположенными резонаторами (тюбинг) : патент 2774961 Российская Федерация / Просвирякова М. В. [и др.]. № 2021129382 ; заявл. 08.10.2021 ; опубл. 24.06.2022.

14. Буклагина Г. В. Интенсификация сушки зерна активным вентилированием с использованием электромагнитного поля СВЧ // Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. 2009. № 2.

15. Совершенствование комбинированного способа сушки листьев табака на основе применения СВЧ-излучений / Л. П. Пестова [и др.] // Сборник научных трудов Всероссийского научно-исследовательского института табака, махорки и табачных изделий. 2019. № 182. С. 317–323.

Поступила 26.09.2022; одобрена после рецензирования 03.11.2022; принята к публикации 28.12.2022

Об авторах:

Просвирякова Марьяна Валентиновна, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов им. академика И. Ф. Бородина РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева (127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3258-260X>, prosviryakova.maryana@yandex.ru

Сторчевой Владимир Федорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации и роботизации технологических процессов им. академика И. Ф. Бородина РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева (127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>, energo-air@rgau-msha.ru

Горячева Наталья Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент Академии гражданского защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, г. Химки, ул. Соколовская, стр. 1А), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4874-3922>, goryacheva.76@mail.ru

Михайлова Ольга Валентиновна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий и систем связи Нижегородского государственного инженерно-экономического университета (606340, Российская Федерация, г. Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1045-2003>, ds17823@yandex.ru

Новикова Галина Владимировна, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Нижегородского государственного инженерно-экономического университета (606340, Российская Федерация, г. Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9222-6450>, novikovagalina@yandex.ru

Сторчевой Александр Владимирович, старший преподаватель кафедры социально-гуманитарных дисциплин Московского государственного университета пищевых производств (125080, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское ш., д. 11), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3404-0361>, alecks.10@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

М. В. Просвирякова – общее руководство проектом, анализ существующих хмелесушилок, исследование электрофизических параметров сырья, построение графических зависимостей.

В. Ф. Сторчевой – инновационная идея ярусного расположения резонаторов в малогабаритной хмелесушилке для фермерских хозяйств, результаты обоснования динамики эндогенного нагрева шишек хмеля при разных напряжениях электрического поля в процессе изменения фактора диэлектрических потерь сырья.

Н. Г. Горячева – работа над текстом статьи, определение эффективных режимов сушки хмеля в каждом резонаторе.

О. В. Михайлова – построение 3D-модели хмелесушилки, исследование электродинамических параметров в программе CST Microwave Studio, SolidWorks.

Г. В. Новикова – формулирование цели, задачи исследования, обоснование конструкции хмелесушилки с оформлением заявки на изобретения.

А. В. Сторчевой – сбор и обработка материалов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Chekha O.V. [Analysis of Hop Production and Processing Market in the System of Food Security of Russia]. *Voprosy regionalnoy ekonomiki*. 2021;(3):95–101. (In Russ.)

2. Vasiliev A.O., Andreev R.V., Alexeev E.P., et al. Research into the Technological Process of Drying Hop in Pcb-750 Dryer. *Vestnik Chuvashskoy GSKhA*. 2019;(1):96–102. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39241139> (accessed 02.10.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

3. Ivanshchikov Yu.V., Makushev A.Ye., Dobrokhotov Yu.N., et al. [Complex for Primary Postharvest Processing of Hops]. Patent 2,680,709 Russian Federation. 2019 February 25. Available at: https://i.moscow/patents/ru2680709c1_20190225 (accessed 02.10.2022). (In Russ.)

4. Mikhaylova O.V., Novikova G.V., Prosviryakova M.V., et al. [Continuous-Flow Hop Dryer with Endogenous Convective Heating Sources]. Patent 2,774,186 Russian Federation. 2022 June 16. Available at: <https://findpatent.ru/patent/277/2774186.html> (accessed 02.10.2022). (In Russ.)

5. Prosviryakova M.V., Storchevoy V.F., Goryacheva N.G., et al. Hop Dryer with Endogenous-Convective Heating Sources. *Vestnik Chuvashskoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2021;(2):91–99. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46615198> (accessed 02.10.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

6. Prosviryakova M.V., Storchevoy V.F., Goryacheva N.G., et al. [Hop Dryer with Toroidal and As-troidal Resonators with Energy Supply in the Electromagnetic Field]. Patent 2,772,992. 2022 May 30. (In Russ.)

7. Mikhaylova O.V., Novikova G.V., Ziganshin B.G., et al. [Microwave Convective Continuous-Flow Hop Dryer with Hemispherical Resonator]. Patent 2,770,628 Russian Federation. 2022 April 19. Available at: <https://findpatent.ru/patent/277/2770628.html> (accessed 02.10.2022). (In Russ.)

8. Prosviryakova M.V., Storchevoy V.F., Goryacheva N.G., et al. [Multiresonator Hop Dryer with Energy Supply in Electromagnetic Field]. Patent 2,772,987 Russian Federation. 2022 May 30. (In Russ.)

9. Sivyakov B.K., Grigoryan S.V. [Mathematical Modeling of a Multi-Wave Microwave Drying Unit]. *Voprosy elektrotekhnologii*. 2019;(4):5–11. (In Russ.)

10. Kazartsev D.A. Development of General Types of Mathematical Models for Drying Food Products with Microwave Energy Supply Based on the Laws of Chemical Kinetics of Heterogeneous Processes. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2021;83(3):17–22. Available at: <https://www.vestnik-vsuet.ru/vguite/article/view/2816> (accessed 02.10.2022). (In Russ.)

11. Novikova G.V., Zhdankin G.V., Mikhaylova O.V., Belov A.A. Analysis of Microwave Installations for Heat Treatment of Raw Materials. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2016;(4):89–93. Available at: <https://www.vestnik-vsuet.ru/vguite/article/view/2816> (accessed 02.10.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

12. Drobakhin O.O., Saltykov D.Yu. [Study of the Possibility of Using Coupled Biconical Resonators to Determine the Parameters of Dielectric Materials]. *Prikladnaya radioelektronika*. 2014;13(1):64–68. (In Russ.)

13. Prosviryakova M.V., Storchevoy V.F., Goryacheva N.G., et al. [Ultrahigh-Frequency Hop Dryer with tiered Resonators (Tubing)]. Patent 2,774,961 Russian Federation. 2022 June 24. (In Russ.)

14. Buklagina G.V. [Intensification of Grain Drying by Active Venting with the Use of Microwave Electromagnetic Field]. *Inzhenerno-tehnicheskoe obespechenie APK. Referativnyy zhurnal*. 2009;(2). (In Russ.)

15. Pestova L.P., Vinevskiy Ye.I., Chernov A.V., Ivanitskiy K.I. [Improvement of the Combined Drying Method of Tobacco Leaves Based on the Use of Microwave Radiation]. *Sbornik nauchnykh trudov Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta tabaka, makhorki i tabachnykh izdeliy*. 2019;(182):317–323. (In Russ.)

Submitted 26.09.2022; revised 03.11.2022; accepted 28.12.2022

About the authors:

Maryana V. Prosviryakova, Dr.Sci. (Engr.), Professor of the I.F. Borodin Chair of Automation and Robotization of Technological Processes, Russian Timiryazev State Agrarian University (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3258-260X>, prosviryakova.maryana@yandex.ru

Vladimir F. Storcheyov, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Head of the I.F. Borodin Chair of Automation and Robotization of Technological Processes, Russian Timiryazev State Agrarian University (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>, energo-air@rgau-msha.ru

Natalya G. Goryacheva, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor, Civil Defence Academy of EMERCOM of Russia (1A Sokolovskaya St., 141435 Khimki, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4874-3922>, goryacheva.76@mail.ru

Olga V. Mikhaylova, Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, Professor of the Chair of Infocommunication Technologies and Communication Systems, Nizhny Novgorod State Engineering and Economics University (22a Oktyabrskaya St., Knyaginino 606340, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1045-2003>, ds17823@yandex.ru

Galina V. Novikova, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Senior Scientist of Nizhny Novgorod State Engineering and Economics University (22a Oktyabrskaya St., Knyaginino 606340, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9222-6450>, novikovagalina@yandex.ru

Aleksandr V. Storcheyov, Senior Lecturer of the Chair of Social and Humanitarian Studies, Moscow State University of Food Production (11 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125080, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3404-0361>, alecks.10@mail.ru

Authors contribution:

M. V. Prosviryakova – general project management, analysis of existing hop dryers, study of electro-physical parameters of raw materials, construction of graphic dependencies.

V. F. Storcheyov – innovative idea of tier arrangement of resonators in a small-sized hop dryer for farms, the results of justification of the dynamics of endogenous heating of hop cones at different electric field strengths in the process of changing the dielectric loss factor of raw materials.

N. G. Goryacheva – work on the text of the article, determining the effective modes of hop drying in each resonator.

O. V. Mikhaylova – construction of 3D model of hop dryer, study of electrodynamic parameters in the program CST Microwave Studio, SolidWorks.

G. V. Novikova – formulation of the goal, objectives of the research, justification of the hop dryer design with the registration of an application for an invention.

A. V. Storcheyov – collection and processing of materials.

All authors have read and approved the final manuscript.